第38卷　第3期
2021年5月

干　旱　区　研　究
ARID　ZONE　RESEARCH

Vol. 38　No. 3
May 2021

甘肃省陇东地区夏季极端降水及典型年环流特征分析

刘梦洋[1,2]，　王小军[2,3]，　柯　杭[4]，　罗志文[5]，　尹义星[6]

（1. 南京信息工程大学大气科学学院，江苏 南京　210044；2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室，江苏 南京　210029；3. 水利部应对气候变化研究中心，江苏 南京　210029；4. 福州市气象局，福建 福州　350008；5. 中国电建集团江西省电力设计院有限公司，江西 南昌　330000；6. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院，江苏 南京　210044）

摘　要：本文采用陇东地区13个气象站的逐日降水和同期NCEP/NCAR再分析资料，基于5个极端降水指数，应用经验正交函数（EOF）、合成分析等方法，研究该地区1967—2015年夏季极端降水的时空特征及极端降水典型年的环流特征。结果表明：(1) 夏季极端降水指数在陇东地区西北部较低，南部和东北部较高，整体呈上升趋势。(2) EOF分析第一特征向量均为正值，第二特征向量则表现为南正北负的反相位分布，在时间系数的极大（小）值年，研究区夏季极端降水在南北方向呈南强（弱）北弱（强）的分布特征最明显。(3) 在强（弱）夏季极端降水典型年，有（无）冷暖空气交汇；上升（下沉）运动增强，向外长波辐射为负（正）异常，对流强（弱），对应着较多（较少）的降水；水汽通量散度为负（正）异常，有利于（不利于）极端降水发生。

关键词：极端降水；陇东地区；环流特征；动力上升条件；水汽条件

受全球气候变暖影响，全球和区域降水、蒸散发、径流等水循环过程都发生了很大变化，进而增大了极端降水事件的发生概率[1-3]。这些极端降水事件导致灾害频发，造成基础设施，经济，自然环境和人口等多方面的损失[4]。在此背景下，迫切需要掌握极端降水特征并探究其影响因素，保证人民生命财产安全及自然、社会、经济和谐发展。

有研究表明，中国极端降水量、强度和发生频率均呈增大趋势[5]，且具有显著的季节变化和南北差异[6-7]。卢珊等[8]全面分析了全国极端降水事件及其起止时间的时空分布和变化特征，结果显示近56 a全国极端降水事件明显增多。陈金明等[9]指出环流异常对我国极端降水事件频数有着重要影响。韩翠等[10]全面分析了环流形式对江淮梅雨区夏季极端降水的影响。陈晓燕[11]研究发现我国西北地区东部受低槽控制，来自孟加拉湾和西太平洋的充足水汽是促进极端降水事件发生的条件之一。

陇东地区位于甘肃省东北部、黄土高原中部，区内生态脆弱敏感，水土流失严重，除了与土壤结构类型有关以外，年内降水集中且多发暴雨是主要原因[12-14]。陇东地区夏季极端降水的发生概率虽小，但对农业生产会产生较为直接的影响与威胁，对生态环境及人民生活都会产生较为严重的影响[15-16]。已有研究表明，黄土高原中部的极端降水量及强度都呈增大趋势[17]；陇东地区极端降水总量、频数、强度和贡献率主要表现为从南向北递减的趋势[18]；环流异常对西北地区东部的夏季降水有着很重要的影响[19]。当前针对研究区夏季降水事件与环流关系方面的研究，主要集中在总降水量方面[19-21]；在夏季极端降水方面的研究相对较少，一般是基于极端降水量，进行500 hPa高度场和850 hPa风场的环流特征和整层水汽特征分析[22]，针对动力上升条件的分析尚不多见。因此，深入研究该区夏季极端降水的特征、极端降水典型年的环流、动力上升条件和

收稿日期：2020-08-28；　**修订日期：**2020-10-29
基金项目：国家重点研发计划课题（2017YFC0403506）；国家自然科学基金（41961124006，51722905）；中央财政水资源节约、管理与保护项目（126302001000150005）
作者简介：刘梦洋（1993-），女，博士研究生，研究方向为水文气象学. E-mail: liumy1019@163.com
通讯作者：王小军. E-mail: xjwang@nhri.cn

水汽条件等，有助于地区防洪减灾和社会经济的发展。

本研究选用5个夏季极端降水指数，采用经验正交分解、合成分析等方法，首先对陇东地区的极端降水指数进行时空特征分析，并挑选出典型年，进一步探究夏季极端降水典型年的环流场配置、动力上升条件和水汽条件等，从而揭示研究区夏季极端降水的影响因素。

1　数据与方法

1.1　数据来源

本文采用降水观测数据为甘肃陇东地区(34.8°~37.2°N，106.4°~108.8°E)13个气象站的逐日降水数据，气象站点分布较均匀(图1)，数据经过质量控制连续无缺测，时间序列长度为1967—2015年。环流数据采用NCEP/NCAR再分析资料的月平均资料，水平分辨率为2.5°×2.5°，所选要素包括位势高度*hgt*(gpm)、经向风u(m·s^{-1})、纬向风v(m·s^{-1})、比湿q(g·kg^{-1})、地面气压p_s(hPa)和向外长波辐射OLR(W·m^{-2})。地球向外长波辐射数据的起始年份为1974年，因此序列长度为1974—2015年，其余数据均为1967—2015年。

1.2　研究方法

1.2.1　极端降水指数　基于欧洲地区极端事件统计和区域动力降尺度项目(STARDEX)[23]的极端气候指数集，根据各指数所表征极端降水的主要特点，本文选择5种基于不同定义方法得到的极端降水指数，包括根据降水强度定义的PINT(雨日降水强度)，基于极值法定义的PX1D(最大1日降水量)和PX5D(最大5日降水量)，和根据百分位法定义的PQ90(90分位降水阈值)和PNL90(高于气候态90%分位数的降水频次)。基于逐日降水数据计算出夏季(6—8月)上述的5个指数。

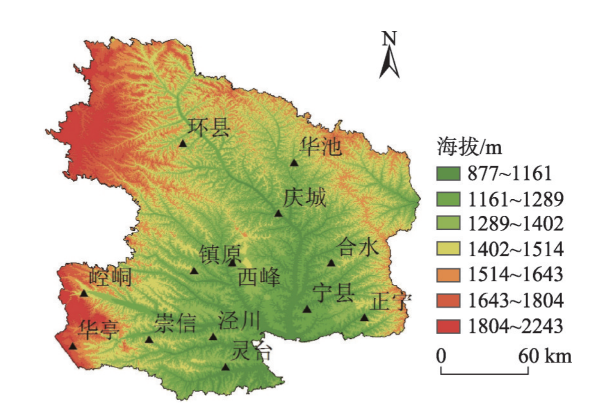


图1　陇东地区气象站点的空间分布

Fig. 1　Spatial distributions of the meteorological stations in Longdong Region

1.2.2　经验正交函数分解　经验正交函数(EOF)分解将m个空间点(观测站点或网格点)的气象要素的n次观测值通过矩阵的形式给出[24]：

$$X=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

EOF方法将X分解为空间函数V和时间函数T，即：

$$X=VT \tag{2}$$

式中：V为m行m列的特征向量矩阵，T为m行n列的时间系数矩阵。

通常，通过检验来验证分解出的EOF是否具有物理意义。North检验[25]和Monte Carlo检验[26]是常用的两种方法，结合两种方法分析EOF方法求得的特征向量是否具有分析价值。

1.2.3　合成分析　气象预报中，通常通过两种不同特征的气象变量的合成分析突出气象变量间的特征差异[27]。一种方法是分别分析高值年和低值年的气象变量平均场，分析高、低年的平均状态；另一种方法将高(低)值年的气象变量与气候态(1981—2010年)的平均值求差值，得到距平场，进而分析高、低值年气象变量与平均状态产生差异的原因。在本研究中，两种方法均被采用。

对于距平场，样本随机性导致特征年与气候态下的变量均值很难相同，所以要对其结果进行检验。t检验方法可以检验样本均值(μ)与总体均值(μ_0)的差异是否显著，经常用于气象领域合成分析的结果检验。原假设H_0:$\mu_0-\mu=0$，定义统计量t：

$$t=\frac{\bar{x}-\mu_0}{s}\sqrt{n} \tag{3}$$

式中：s和n分别为样本标准差和样本量。若$t \geqslant t_\alpha$，(t_α为确定显著性水平α的临界值)，否定原假设。

2　结果与分析

2.1　夏季极端降水时空特征

图2为陇东地区各指数1967—2015年多年平均值的空间分布。由图2a可知，PINT指数在陇东地区东南部较高，最高达8.19 mm·d^{-1}；在西北部较低，

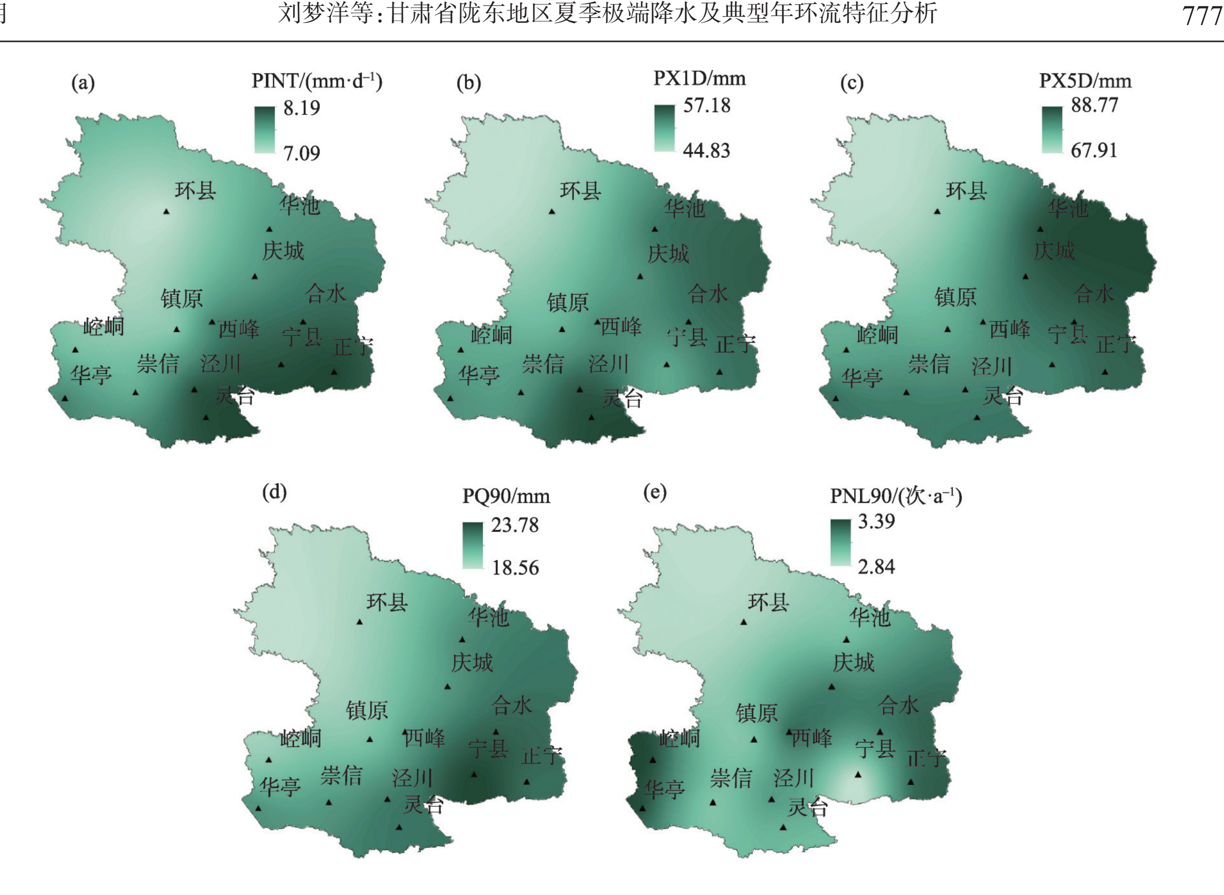


图2 夏季极端降水指数多年平均值的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of the long-term average summer extreme precipitation indices

最低值为7.09 mm·d^{-1}。PX1D指数在南部和东北部较高，其中南部最高值达57.18 mm；在西北部较低，最低值为44.83 mm（图2b）。PX5D指数在东北部较高，最高达88.77 mm；在西北部较低，最低值为67.91 mm（图2c）。PQ90指数在东南部较高，最高达23.78 mm；在西北部较低，最低值为18.56 mm（图2d）。PNL90指数在西南部、中部以及东南部都较高，其中西南部最高达3.39 次·a^{-1}；在中南部和西北部较低，最低值出现在中南部，为2.84 次·a^{-1}（图2e）。总体上，5个夏季极端降水指数在陇东地区的西北部都较低，南部和东北部则多为高值区。

图3为陇东地区各指数（1967—2015年）趋势检验的空间分布。由图3a可知，PINT指数在整个研究区内呈上升趋势，且南部3个站点上升显著，分别达到了0.05和0.1显著性水平。PX1D指数除中部1个站点和东北部2个站点下降外，其他站点均上升，且上升和下降都不显著（图3b）。PX5D指数除中部1个站点下降外，其他站点均上升，且上升和下降都不显著（图3c）。PQ90指数除西部1个站点下降外，其他站点均上升，其中，仅南部1个站点上升显著达0.1显著性水平，其他站点的上升和下降都不显著（图3d）。PNL90指数除西部和中部4个站点呈下降外，其他站点均上升，其中，西部的1个站点下降显著达0.05显著性水平，其他站点的上升和下降都不显著（图3e）。整体上，5个夏季极端降水指数均以上升为主，但大部分站点上升不显著；指数下降的站点较少，主要位于西部、中部，且一般不显著。

2.2 夏季极端降水指数的EOF分析

采用EOF分解分别对5个指数的距平序列（1967—2015年）进行时空分离，获得特征向量及对应时间系数，并对结果进行检验。由各指数前两个模态的方差贡献可知（表1）。各指数前两个模态方差贡献率都较大，累积贡献率均达50%以上，且均通过了North检验和Monte-Carlo检验，能较好地代表夏季极端降水指数在陇东地区的主要时空格局特征。因此，本文主要分析EOF结果的第一、第二模态。

图4为夏季PINT指数第一、第二模态的特征向量和时间系数（PX1D、PX5D、PQ90和PNL90的结果与PINT类似，图略）。由图4a可知，指数第一模态的特征向量在整个研究区均为正值，反映各指数具有一致变化的特征，PINT指数的正值中心为陇东地

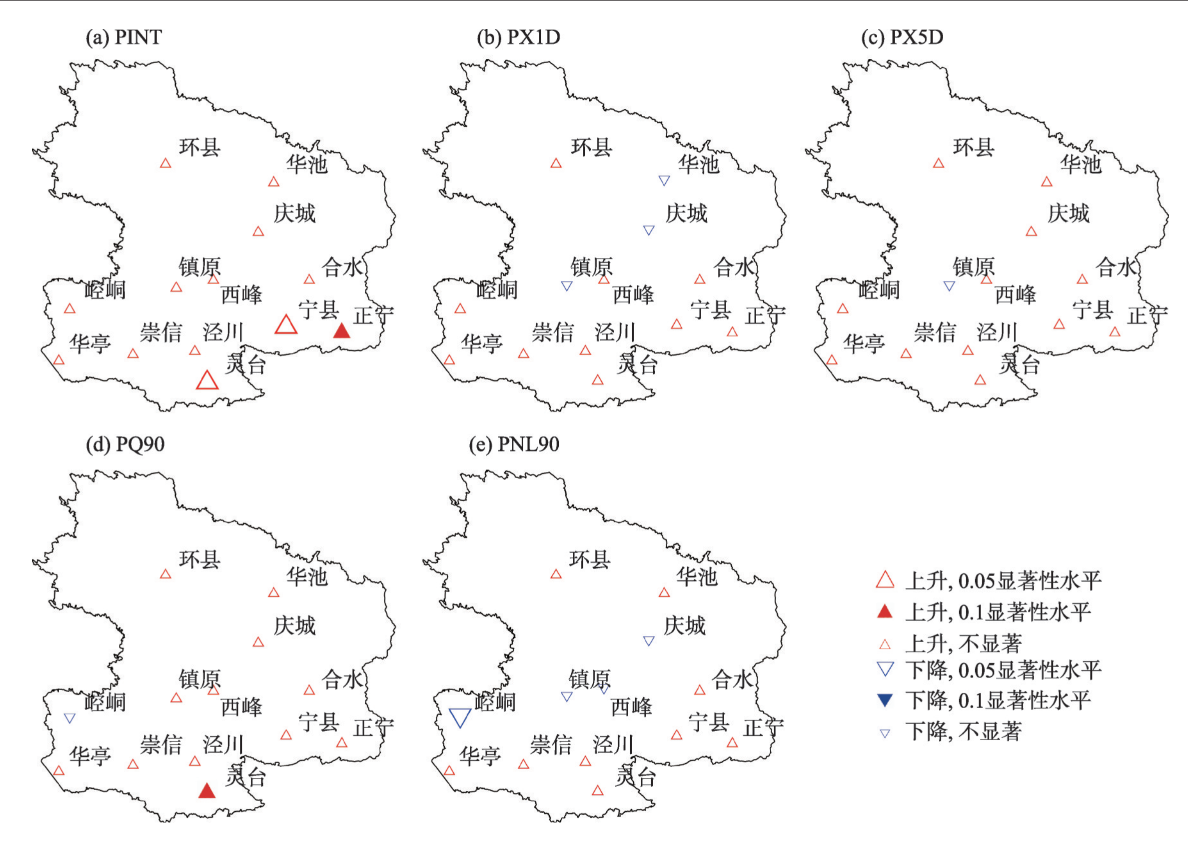


图3 夏季极端降水指数趋势检验的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of the linear trend of the summer extreme precipitation indices

表1 各指数EOF分析第一、第二模态的方差贡献率

Tab. 1 Variance contribution rates of the first and second EOF eigenvectors of the indices

指数	方差贡献率/%		
	第一模态	第二模态	累积
PINT	45.82	15.23	61.05
PX1D	32.00	18.02	50.02
PX5D	48.02	14.15	62.17
PQ90	37.46	15.29	52.75
PNL90	38.68	16.19	54.87

区南部，大值区主要位于中部和南部。从对应的时间系数图可知(图4c)，PINT指数的第一模态时间系数每十年上升速率为1.218，通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验，最大(小)值出现在2013(1974)年。其他指数的第一模态时间系数也呈上升趋势，但不显著。在各夏季极端降水指数时间系数的极大值年(极小值年)，陇东地区夏季极端降水为历年最强(最弱)。

由图4b可知，各指数第二模态的特征向量在陇东地区表现为南正北负的反相位分布，正值中心为陇东地区南部，负值中心为北部，即夏季极端降水在陇东地区的南北方向上有南强北弱或南弱北强的分布。从对应的时间系数图可知(图4d)，PINT指数的第二模态时间系数呈不显著上升，最大(小)值出现在2010(1995)年。在各夏季极端降水指数时间系数的极大值年(极小值年)，出现南强北弱(南弱北强)的特征最明显。

借助5个夏季极端降水指数(PINT、PX1D、PX5D、PQ90和PNL90)EOF分析结果进行典型年选取。首先，计算各指数第一模态时间系数 T 的标准差 σ，当某一年 $|T|>\sigma$ 时，选取该年份为该指数的典型年，根据时间系数的正负值，分别将绝对值排在前5位的年份作为典型的强年(正值)和弱年(负值)。综合考虑5个指数各自的典型年份(将5个指数中出现次数最多的几个典型年份作为最终的典型年)，选取了陇东地区夏季极端降水典型年(强年为1981年、1992年、1996年、2010年和2013年，弱年为1969年、1972年、1974年、1991年和2015年)。

2.3 夏季极端降水的环流场

强、弱极端降水年的夏季500 hPa平均高度场如图5a、图5b所示，粗黑线为5880 gpm特征线。在强极端降水典型年，我国中纬度处有一浅槽，陇东地区位于槽后位置，低槽引导气流向东南移动，有

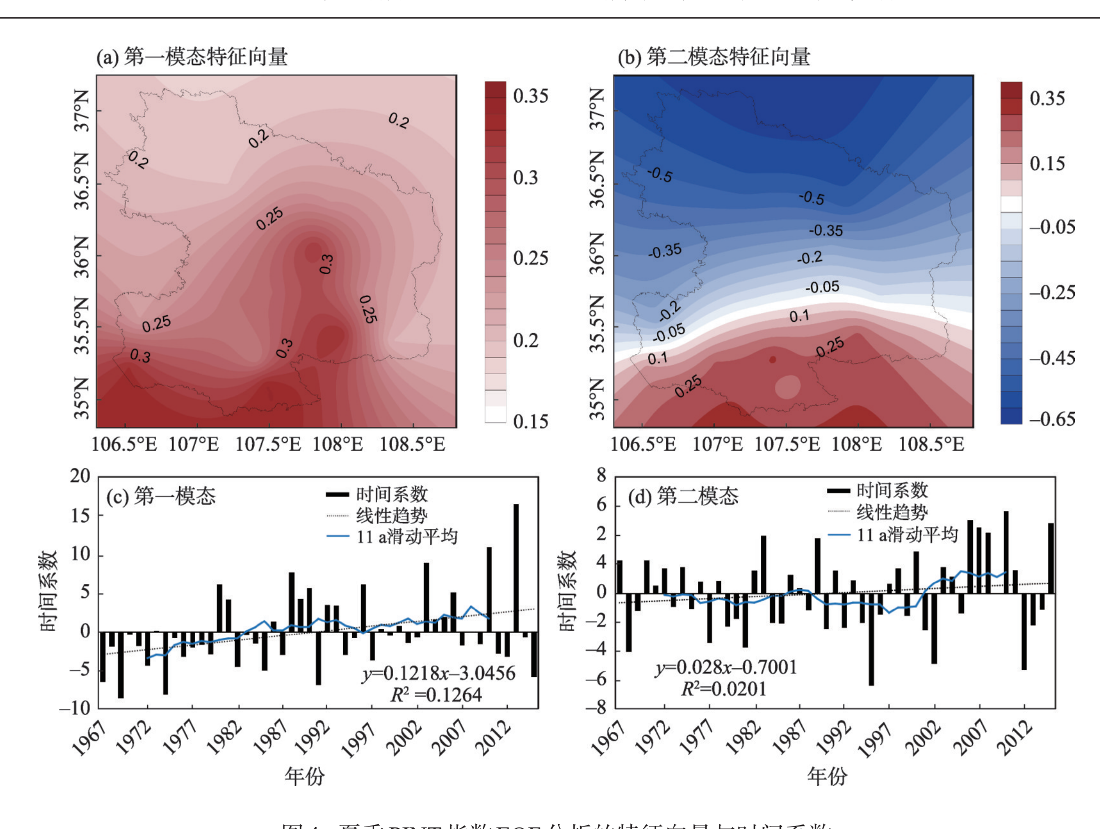
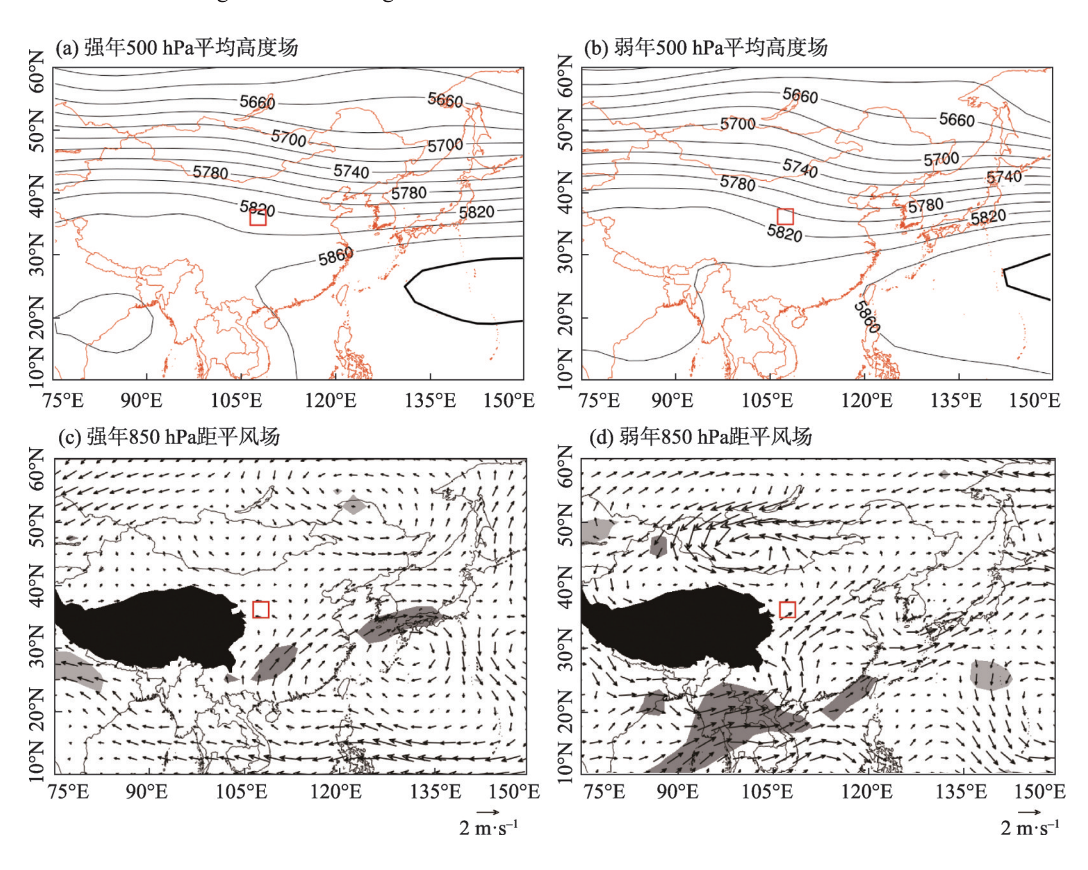


图4 夏季PINT指数EOF分析的特征向量与时间系数

Fig. 4 The EOF eigenvectors and time coefficients of the summer PINT



注：红色方框为研究区位置。下同。

图5 夏季极端降水典型年500 hPa平均高度场和850 hPa距平风场

Fig. 5 500 hPa mean geopotential height fields and 850 hPa wind anomaly fields in the typical years of summer extreme precipitation

利于北方冷空气输入研究区;同时,西太平洋上空的副高较强,5880 gpm特征线西伸至130°E附近,副高带来的暖湿空气可以到达研究区附近,冷暖空气交汇有利于极端降水形成。在弱极端降水典型年,陇东地区虽位于槽后位置,有北方冷空气流入;但西太平洋副高较弱,5880 gpm特征线东退,暖湿空气不能到达研究区与冷空气交汇。

强、弱极端降水年的夏季850 hPa距平风场如图5c、图5d,阴影区通过检验(a=0.05)。在强极端降水典型年,陇东地区有东南风异常,即沿着副高西北侧的西南风达到研究区附近转向西北,带来较多暖湿空气,且研究区北方北风异常,向南输送冷空气,冷暖空气汇合利于极端降水生成;在弱极端降水典型年,陇东地区为西南风异常,来自印度洋的暖湿空气经过研究区向北输送,但缺少向南输送的冷空气与之汇合。

2.4 夏季极端降水的动力上升条件

水平散度,即风速水平分量的散度,可表征空气在水平方向上辐合辐散的强弱,水平辐合辐散会产生垂直方向的上升或下沉运动,将不同高度上的水平散度结合,分析其在垂直方向上的配置,可以得到研究区上空的动力上升条件。表2给出陇东地区强、弱极端降水年的夏季100 hPa、200 hPa、500 hPa和850 hPa水平散度距平特征。在强极端降水典型年,陇东地区100 hPa等压面上的水平散度正异常,200 hPa、500 hPa和850 hPa等压面上的水平散度均为负异常,即研究区对流层从低层气流一直到200 hPa均异常辐合,高层100 hPa气流异常辐散,上升运动很强,有助于极端降水的生成。在弱极端降水典型年,陇东地区200 hPa等压面上的水平散度为负异常,100 hPa、500 hPa和850 hPa等压面上的水平散度为正异常,即研究区对流层顶层和低层气流异常辐散、高层异常辐合,因此下沉运动增强,不利于极端降水的生成。

表2 夏季极端降水典型年水平散度距平

Tab. 2 The horizontal divergence anomaly in the typical years of summer extreme precipitation

	100 hPa	200 hPa	500 hPa	850 hPa
强极端降水年	+	−	−	−
弱极端降水年	+	−	+	+

注:+号表示水平散度正异常,−号表示水平散度负异常。

向外长波辐射(OLR),即大气层顶向外长波辐射,由云顶温度决定。当有深厚云层时,云顶高且温度低,向外长波辐射值低,表征对流运动较强,因此反映降水较强;反之,向外长波辐射值大,则对流运动较弱,反映降水较弱[28]。图6为陇东地区强、弱极端降水年的夏季OLR距平场,黑点区域通过检验(a=0.05)。在强极端降水典型年,陇东地区夏季OLR距平为负值,表明向外长波辐射较平常要弱,说明陇东地区对流活动较强,上空有深厚的云层,对应着较多的极端降水;而在弱极端降水典型年,夏季OLR距平为正值,表明向外长波辐射较平常要强,说明陇东地区对流活动较弱,上空云层较薄,对应着较少的极端降水。

2.5 夏季极端降水的水汽条件

强、弱极端降水年夏季整层水汽通量及其散度距平场如图7,黑点区域通过检验(a=0.05)。由图7a、图7b可知,在强极端降水典型年,陇东地区水汽

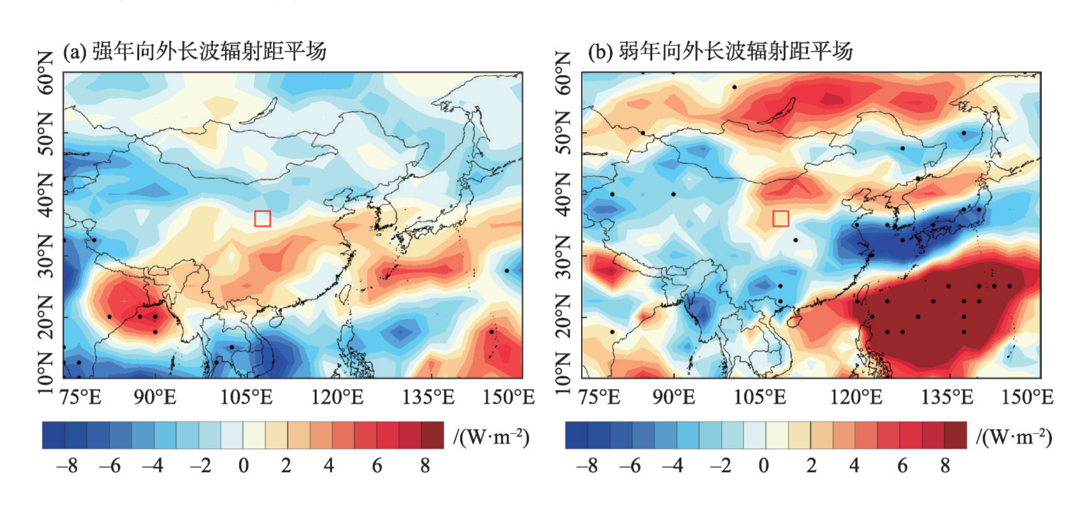


图6 夏季极端降水典型年向外长波辐射距平场

Fig. 6 The anomaly fields of OLR in the typical years of summer extreme precipitation

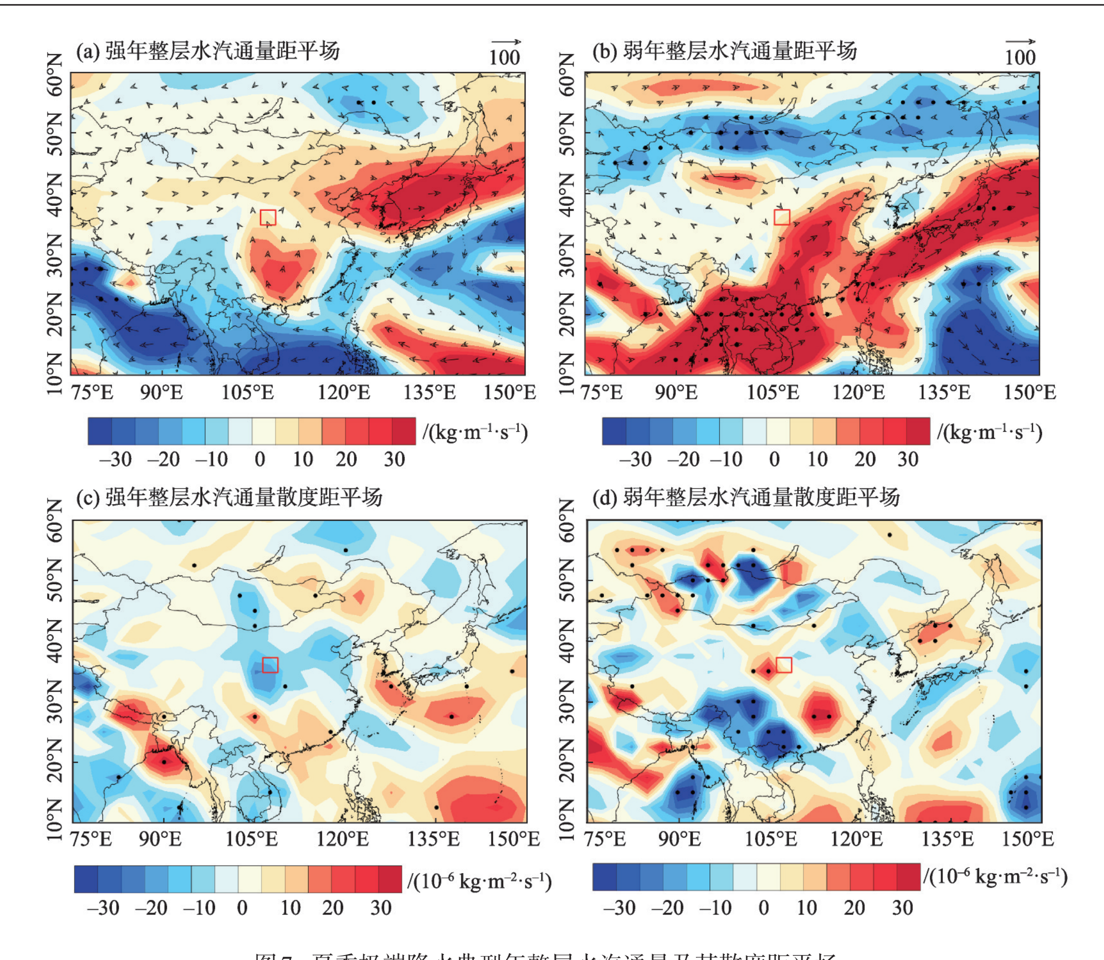


图7　夏季极端降水典型年整层水汽通量及其散度距平场

Fig. 7　The anomaly fields of the vertically integrated water vapor flux and divergence in the typical years of summer extreme precipitation

通量为正异常,水汽主要来源为西太平洋,所含水分较多,经过我国东南部到达研究区,同时北侧还有一部分是西风带输送来的水汽;在弱极端降水典型年,陇东地区水汽通量为弱正异常,来自印度洋经我国西南至研究区的水汽仅为过境水汽,因此极端降水较弱。

由图7c、图7d可知,在强极端降水典型年,陇东地区水汽通量散度为负距平,说明水汽通量散度较气候态小,为水汽汇,有利于水汽在该区域聚集,容易形成极端降水;在弱极端降水典型年,陇东地区为正距平,说明水汽通量散度较气候态大,为水汽源,研究区整体上向外流失水汽,极端降水不易生成。

3　讨 论

甘肃省陇东地区的夏季极端降水,作为极端天气事件,在一年中出现的概率虽然不高,但由于研究区属于半干旱区,生态环境脆弱,因此对地区农业生产、生态环境和人民生活有直接的重大影响。并且,全球气候变暖导致全球和区域水循环过程发生变化,水循环加快,降水的时空分布更加不均匀,增大了极端降水事件的发生概率。本文重点探讨此背景下研究区夏季极端降水的时空特征及影响因素。区域夏季极端降水的时空特征方面,趋势检验和EOF分解第一模态时间系数结果均显示夏季极端降水指数以上升为主,然而上升趋势并不显著,这与王兴梅[16]等的结论一致。EOF第二特征向量反映研究区夏季极端降水南北方向上有南强(弱)北弱(强)的分布特征,与赵红岩等[29]的研究一致,其研究表明此分布特征是由地理位置、地形、冷空气入侵路径、天气系统影响等因素引起。夏季极端降水的影响因素方面,众多研究表明,大气环流异常是导致我国极端降水频率和强度发生变化的重要原因[5,30]。本文对强、弱夏季极端降水典型年的物理量场进行合成分析,结果表明,大气环流形势、

动力上升条件和水汽条件都对研究区夏季极端降水的异常变化产生重要影响。本文研究结果有助于更深入理解陇东地区的夏季极端降水特征，可为区域防灾减灾和人民生产、生活提供重要参考。

4 结 论

（1）夏季极端降水指数(PINT、PX1D、PX5D、PQ90和PNL90)的分析表明，多年平均空间分布表现为陇东地区西北部较低，南部和东北部较高。5个指数均以上升为主，但多数站点上升不显著；指数下降的站点较少，主要位于西部、中部，且一般不显著。

（2）5个指数EOF分析第一模态的特征向量在整个研究区均为正值，反映各指数具有一致变化的特征，对应的时间系数有上升趋势，其中PINT指数上升显著；第二模态的特征向量在陇东地区表现为南正北负的反相位分布，正值中心为陇东地区南部，负值中心为北部，即夏季极端降水在陇东地区南北方向上有南强北弱或南弱北强的分布，对应的时间系数有上升趋势，但不显著。

（3）在强(弱)夏季极端降水典型年，500 hPa平均高度场上，陇东地区处于槽后位置，西太副高较强(较弱)；850 hPa距平风场上，陇东地区为东南风异常(西南风异常)，有(无)冷暖空气汇合，有利(不利)于降水生成。

（4）夏季极端降水的动力上升条件，在强(弱)夏季极端降水典型年，陇东地区上升(下沉)运动增强；OLR距平场上，陇东地区为负值(正值)，表明地球向外长波辐射较平常要弱(强)，说明陇东地区对流活动强(弱)，上空有深厚(浅薄)的云层，对应较多(较少)的极端降水。

（5）夏季极端降水的水汽条件：强(弱)夏季极端降水典型年，陇东地区水汽通量为正(弱正)异常，水汽通量散度为负(正)异常，研究区为水汽汇(源)，有利于(不利于)极端降水生成。

参考文献(References)：

[1] Aalst M K V. The Impacts of climate change on the risk of natural disasters[J]. Disasters, 2006, 30(1): 5–18.

[2] Hu Y, Maskey S, Uhlenbrook S. Trends in temperature and rainfall extremes in the Yellow River source region, China[J]. Climatic Change, 2012, 110(1–2): 403–429.

[3] Stott P. How climate change affects extreme weather events[J]. Science, 2016, 352(6293): 1517–1518.

[4] IPCC. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.

[5] 高涛, 谢立安. 近50年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J]. 地球科学进展, 2014, 29(5): 577–589. [Gao Tao, Xie Li'an. Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(5): 577–589.]

[6] 陈海山, 范苏丹, 张新华. 中国近50 a极端降水事件变化特征的季节性差异[J]. 大气科学学报, 2009, 32(6): 744–751. [Chen Haishan, Fan Sudan, Zhang Xinhua. Seasonal differences of variation characteristics of extreme precipitation events over China in the last 50 years[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2009, 32(6): 744–751.]

[7] Zhang Q, Singh V P, Sun P, et al. Precipitation and streamflow changes in China: Changing patterns, causes and implications[J]. Journal of Hydrology, 2011, 410(3–4): 204–216.

[8] 卢珊, 胡泽勇, 王百朋, 等. 近56年中国极端降水事件的时空变化格局[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 683–693. [Lu Shan, Hu Zeyong, Wang Baipeng, et al. Spatio-temporal patterns of extreme precipitation events over China in recent 56 years[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(4): 683–693.]

[9] 陈金明, 陆桂华, 吴志勇, 等. 1960—2009年中国夏季极端降水事件与气温的变化及其环流特征[J]. 高原气象, 2016, 35(3): 675–684. [Chen Jinming, Lu Guihua, Wu Zhiyong, et al. Change properties of summer extreme precipitation events and temperature and associated large-scale circulation in China during 1960–2009[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(3): 675–684.]

[10] 韩翠, 尹义星, 黄伊涵, 等. 江淮梅雨区1960—2014年夏季极端降水变化特征及影响因素[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(5): 445–455. [Han Cui, Yin Yixing, Huang Yihan, et al. Variation characteristics and influencing factors of extreme precipitation in the Meiyu area of Yangtze-Huai River Basin during 1960–2014 [J]. Climate Change Research, 2018, 14(5): 445–455.]

[11] 陈晓燕. 中国北方极端降水事件特征及成因研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012. [Chen Xiaoyan. Studies on the Characteristics and Formative Causes of Extreme Precipitation Events in the Northern China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.]

[12] 林纾, 王毅荣. 中国黄土高原地区降水时空演变[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 502–508. [Lin Shu, Wang Yirong. Spatial-temporal evolution of precipitation in China Loess Plateau[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(3): 502–508.]

[13] 王晖, 隆霄, 马旭林, 等. 近50 a中国西北地区东部降水特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 712–718. [Wang Hui, Long Xiao, Ma Xulin, et al. Precipitation in the eastern part of Northwest China in

recent 50 years[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(4): 712-718.]

[14] 商沙沙, 廉丽姝, 马婷, 等. 近54 a中国西北地区来气温和降水的时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 68-76. [Shang Shasha, Lian Lishu, Ma Ting, et al. The temporal and spatial characteristics of temperature and precipitation in northwestern China in recent 54 years[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 68-76.]

[15] 赵庆云, 张武, 王式功, 等. 西北地区东部干旱半干旱区极端降水事件的变化[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 112-117. [Zhao Qingyun, Zhang Wu, Wang Shigong, et al. Change of extreme precipitation events in arid and semi-arid regions in the east of Northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(6): 112-117.]

[16] 王兴梅, 张勃, 戴声佩, 等. 甘肃省黄土高原区夏季极端降水的时空特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 223-229. [Wang Xingmei, Zhang Bo, Dai Shengpei, et al. Spatial and temporal characteristics of summer extreme precipitation in Loess Plateau of Gansu Province, China[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(1): 223-229.]

[17] 李志, 郑粉莉, 刘文兆. 1961—2007年黄土高原极端降水事件的时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 291-299. [Li Zhi, Zheng Fenli, Liu Wenzhao. Analyzing the spatial-temporal changes of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1961 to 2007[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2): 291-299.]

[18] 姜广旭, 刘九夫, 王小军, 等. 甘肃省陇东地区极端降水的时空特征[J]. 水电能源科学, 2020, 38(2): 9-12. [Jiang Guangxu, Liu Jiufu, Wang Xiaojun, et al. Temporal and spatial characteristics of extreme precipitation in Longdong Region[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(2): 9-12.]

[19] 王雅琦, 冯娟, 李建平, 等. 西北地区东部夏季降水年际变化特征及其与环流的关系[J]. 高原气象, 2020, 39(2): 290-300. [Wang Yaqi, Feng Juan, Li Jianping, et al. Interannual variation of summer precipitation in the eastern of Northwest China and its relationship with circulation[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(2): 290-300.]

[20] 邵小路, 姚凤梅, 张佳华, 等. 华北地区夏季旱涝的大气环流特征诊断[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 131-137. [Shao Xiaolu, Yao Fengmei, Zhang Jiahua, et al. General circulation over north China in drought and flood summers[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(1): 131-137.]

[21] 杨莲梅, 关学锋, 张迎新. 亚洲中部干旱区降水异常的大气环流特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 249-259. [Yang Lianmei, Guan Xuefeng, Zhang Yingxin. Study on atmospheric circulation characteristics of precipitation anomalies in arid region of Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 249-259.]

[22] 皮原月. 西北干旱区极端气候变化及其与大气环流和海表温度的联系[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017. [Pi Yuanyue. Extreme Climate Change and Its Relationship with Atmospheric Circulation and Sea Surface Temperature in the Arid Area of Northwest China[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2017.]

[23] Chauvin F, Denvil S. Changes in severe indices as simulated by two French coupled global climate models[J]. Global and Planetary Change, 2007, 57(1-2): 96-117.

[24] Lorenz E N. Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction[R]. Cambridge: MIT Department of Meteorology, 1956.

[25] 曹鸿兴, 魏凤英, 刘生长. 多步预测的降水时序模型[J]. 应用气象学报, 1993, 4(2): 198-204. [Cao Hongxing, Wei Fengying, Liu Shengzhang. Multi-step prediction model of time series for precipitation[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1993, 4(2): 198-204.]

[26] 魏凤英, 曹鸿兴. 模糊均生函数模型及其应用[J]. 气象, 1993, 19(2): 7-11. [Wei Fengying, Cao Hongxing. A fuzzy mean generating function (FMGF) model and its application[J]. Meteorological Monthly, 1993, 19(2): 7-11.]

[27] 施能, 魏凤英, 封国林, 等. 气象场相关分析及合成分析中蒙特卡洛检验方法及应用[J]. 南京气象学院学报, 1997, 20(3): 355-359. [Shi Neng, Wei Fengying, Feng Guolin, et al. Monte Carlo Test used in correlation and composite analysis of meteorological fields[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1997, 20(3): 355-359.]

[28] 林爱兰, 梁建茵. 向外长波辐射(OLR)与广东降水[J]. 热带气象学报, 1993, 9(3): 248-255. [Lin Ailan, Liang Jianyin. Correlation between outgoing longwave radiation (OLR) and precipitation in Guangdong[J]. Journal of Tropical Meteorology, 1993, 9(3): 248-255.]

[29] 赵红岩, 王有恒, 王兴, 等. 1961—2008年中国西北东部旱涝异常分布及干旱变化特征[J]. 干旱区地理, 2012, 35(4): 552-558. [Zhao Hongyan, Wang Youheng, Wang Xing, et al. Anomaly distribution of drought-flood and changing characteristics of arid over eastern Northwest China during 1961-2008[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(4): 552-558.]

[30] Ding Y, Wang Z, Sun Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences[J]. International Journal of Climatology, 2008, 28(9): 1139-1161.

Analysis of extreme summer precipitation characteristics and typical years' circulation characteristics in Longdong Region

LIU Mengyang[1,2], WANG Xiaojun[2,3], KE Hang[4], LUO Zhiwen[5], YIN Yixing[6]

(1. School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China; 3. Research Center for Climate Change, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, Jiangsu, China; 4. Fuzhou Meteorological Bureau, Fuzhou 350008, Fujian, China; 5. Power China Jiangxi Electric Power Engineering Co., Ltd., Nanchang 330000, Jiangxi, China; 6. School of Hydrology and Water Resources Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China)

Abstract: Global climate change accelerates the global and regional hydrological cycle processes, which alter the spatio-temporal distribution of precipitation. Consequently, extreme precipitation events are becoming ever more frequent, which greatly impacts people's lives. Longdong Region is a semi-arid area with a fragile ecological environment. Therefore, the extreme summer precipitation in this region has a more direct and significant impact on agricultural production, the ecological environment, and people's lives. We used the daily precipitation data from 13 meteorological stations and NCEP/NCAR reanalysis data in the Longdong Region as the basis for exploring five extreme precipitation indices to explore spatio-temporal characteristics of extreme summer precipitation from 1967 to 2015 and the circulation characteristics of typical years with the help of the empirical orthogonal function (EOF) and composite analysis. The preliminary results showed that the extreme summer precipitation indices are smaller in the Northwest of the Longdong Region than in the south and Northeast, showing an overall upward trend. The EOF eigenvectors of the first mode are "+" in the whole area, "+" for the second mode in the south, and "−" in the north. The "strong in the south (north) and weak in the north (south)" distribution features of extreme summer precipitation are the most obvious in the year, with the maximum (minimum) time coefficient in the second mode. In the typical strong (weak) extreme summer precipitation year, there are (not) cold and warm air convergence in Longdong Region. The ascending (descending) motion in the study area was enhanced, and the outgoing longwave radiation (OLR) anomaly is negative (positive), indicating the convective activity is strong (weak), corresponding to more (less) precipitation. Meanwhile, the convergence (divergence) of water vapor flux is favorable (unfavorable) to the generation of extreme summer precipitation. In conclusion, the atmospheric circulation, dynamic conditions, and water vapor conditions all affect the anomalous changes of extreme summer precipitation in the study area. This paper's results contribute to a deeper understanding of the characteristics and influencing factors of extreme summer precipitation in the Longdong Region, which provides meaningful references for regional disaster prevention and mitigation.

Keywords: extreme precipitation; Longdong Region; atmospheric circulation; dynamic condition; water vapor